



Analyse des niveaux d'eau avec l'action des vagues au droit d'une plage de Méditerranée

Xavier KERGADALLAN¹, Nathalie METZLER¹

1. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), Plouzané, France. Xavier.Kergadallan@cerema.fr

Résumé :

La façade maritime méditerranéenne est bordée par plusieurs départements littoraux sur lesquels des enjeux de gestion du Domaine Public Maritime (DPM) naturel forts existent. La délimitation du DPM est complexe et un éventail de techniques est disponible. Afin d'apporter des éléments d'appréciation, le Cerema s'est penché sur l'approche probabiliste qui vise à estimer l'action des vagues au niveau du rivage à partir des données hydrauliques disponibles.

Les périodes de retour associées au niveau d'eau avec l'action des vagues sont étudiées pour une plage à enjeux de Méditerranée. Le sujet étant sensible, toute référence à la localisation de cette plage a été supprimée.

Ce travail utilise les données de niveau d'eau issues des observations (données REFMAR sous data.shom.fr) et des données d'états de mer issues de la simulation numérique (données ANEMOC-2, EDF R&D et Cerema).

Deux approches probabilistes sont utilisées. La première est une approche empirique pour l'estimation des périodes de retour inférieures ou égales à un an. La deuxième, pour les périodes de retour supérieures à un an, est une approche basée sur la théorie des valeurs extrêmes avec la modélisation de la dépendance vague / niveau par une loi bivariée des valeurs extrêmes (loi de Gumbel). Pour la deuxième approche, du fait du domaine de validité limité de la loi bivariée, le résultat est encadré par une estimation basse (non conservative) et une estimation haute (conservative).

Pour ces deux approches la modification des états de mer lors du transfert des vagues du large à la côte est prise en compte. L'action des vagues sur le niveau d'eau est calculée par la formule de wave run-up de STOCKDON *et al.* (2006).

Les résultats se présentent pour un site donné sous la forme de plusieurs profils de période retour pour une pente donnée de la plage et avec des domaines de validité différents. Les limites associées à ces résultats sont discutées.

Mots-clés : Domaine public maritime naturel, Valeurs extrêmes, Période de retour, Niveaux d'eau, Vagues, Analyse statistique, Loi bivariée, Méditerranée.

1. Introduction

La façade maritime méditerranéenne est bordée par plusieurs départements littoraux sur lesquels des enjeux de gestion du Domaine Public Maritime (DPM) naturel forts

existent. La délimitation du DPM est complexe et un éventail de techniques est disponible. Afin d'apporter des éléments d'appréciation, le Cerema s'est penché sur l'approche probabiliste qui vise à estimer l'action des vagues au niveau du rivage à partir des données hydrauliques disponibles.

Les périodes de retour associées au niveau d'eau avec l'action des vagues sont étudiées pour une plage à enjeux de Méditerranée. Le sujet étant sensible, toute référence à la localisation de cette plage a été supprimée. Cela concerne les plans de situation, mais aussi les références et certaines caractéristiques des données utilisées.

Le niveau d'eau étudié est issu de la combinaison d'un niveau de marée, de la surcote météorologique (surcote atmosphérique et surcote liée au vent) et du wave run-up (surcote liée aux vagues). Le wave run-up est défini par une hauteur dépassée un certain pourcentage du temps. Ce pourcentage est généralement de 2 %, c'est la valeur de référence prise ici.

L'analyse proposée est une analyse statistique. En l'absence de donnée d'observation au droit des sites d'étude, elle s'appuie sur la méthode d'analyse spatiale développée par KERGADALLAN (2015). Initialement appliquée à l'estimation des niveaux d'eau intégrant le wave set-up, la méthode est adaptée ici à l'estimation des niveaux d'eau intégrant le wave run-up. La méthode est aussi complétée par une modélisation du transfert des vagues du large à la côte, une des principales limites identifiées sur le travail de KERGADALLAN (2015).

Le présent article s'articule en trois parties. La première décrit la méthodologie mise en œuvre. Sont ensuite présentés les résultats des estimations des niveaux d'eau avec le wave run-up ainsi que les limites associées. La dernière partie présente la conclusion et propose des suites à donner.

2. Méthodologie

Les méthodes d'analyse statistique mises en œuvre sont au nombre de deux. La première est basée sur une approche empirique et permet l'estimation des périodes de retour inférieures ou égales à un an. La deuxième est basée sur la théorie des valeurs extrêmes et permet l'estimation des périodes de retour supérieures à un an.

2.1 Données en entrée

Les données utilisées sont des données de niveau d'eau au marégraphe, de vagues et de pente de la plage.

2.1.1 Niveaux d'eau

Les niveaux d'eau utilisés sont les données horaires issues des observations marégraphiques dans les ports. L'influence des vagues sur ces observations n'est pas clairement identifiée par la littérature pour les ports étudiés (BRGM, 2010). On considère ici que le marégraphe enregistre seulement le niveau de marée et la surcote

météorologique. Pour le distinguer d'un niveau d'eau à la côte qui prend en compte la surcote liée aux vagues, ce niveau est appelé le niveau au marégraphe.

On considère qu'un minimum de dix années d'observation est nécessaire pour mettre en œuvre les méthodes d'analyse statistique décrites ici. Les observations sont corrigées des effets de l'eustatisme par la méthode développée par KERGADALLAN (2015).

Ne disposant pas de marégraphe au droit du site d'étude (point X sur la figure 1), deux estimations vont être effectuées sur la base des données disponibles aux marégraphes encadrant le site (marégraphes P1 et P2 sur la figure 1). L'estimation finale sera obtenue par la moyenne (pondérée par la distance d'éloignement) de ces deux estimations. Un marégraphe est présent à proximité du site (marégraphe P0 sur la figure 1). Sa durée d'observation étant inférieure à dix ans, il est seulement utilisé pour corriger les effets dus à l'éloignement des points P1 et P2 par rapport à X.

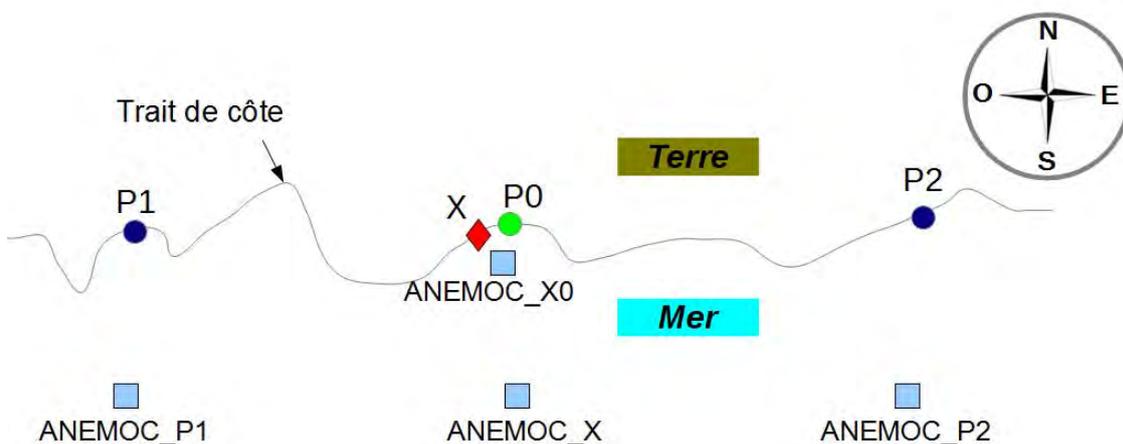


Figure 1. Schéma de localisation des points d'intérêt.

2.1.2 Vagues

Les données horaires de vagues utilisées sont issues de la base ANEMOC-2. ANEMOC-2 est une base de données des états de mer construite à partir de simulations rétrospectives des états de mer (hindcast) du 01/01/1979 au 31/12/2010. Ce travail est issu d'une collaboration entre EDF R&D et le Cerema.

Les paramètres utilisés sont la hauteur significative (H_{m0}), la direction moyenne de provenance des vagues (DIR), la période moyenne (T_{02}).

Quatre points ANEMOC2 sont utilisés (voir figure 1). Deux au large des marégraphes P1 et P2 pour modéliser la dépendance vagues / niveau au marégraphe et deux au niveau du site d'étude pour prendre en compte les spécificités du site. Comme on le verra dans la suite de l'article, les observations de vagues aux sites P1 et P2 sont utilisées pour modéliser la dépendance entre les niveaux observés au marégraphe et les hauteurs de vagues, afin de la transposer au site d'étude (point X). Il est donc choisi des

Thème 7 – Risques côtiers

points ANEMOC au large (ANEMOC_P1 et ANEMOC_P2) afin de ne pas polluer le modèle de dépendance par des effets locaux en P1 ou P2, non représentatif du point X.

2.1.3 Pente de la plage

Pour le calcul du wave run-up il est nécessaire de disposer de la pente de la plage. Les pentes sont ici estimées à partir des données de la base Litto3D®. Litto3D® est un modèle numérique altimétrique précis continu terre-mer réalisé en commun par le SHOM et l'IGN.

2.2 Approche empirique

Cette approche est mise en œuvre pour le calcul des périodes de retour inférieures ou égales à un an.

Deux estimations de niveau d'eau avec le wave run-up sont effectuées, la première par rapport au marégraphe *P1* et la deuxième par rapport au marégraphe *P2*. Le résultat est une moyenne (pondérée par la distance d'éloignement au site d'étude) de ces deux estimations.

Pour un marégraphe donné (*P1* ou *P2*) nous disposons d'observations simultanées de niveau au marégraphe et de vagues (aux points *P1* et *ANEMOC_P1* ou aux points *P2* et *ANEMOC_P2*). On considère que ces observations simultanées sont représentatives de ce que l'on pourrait observer pour le site d'étude. Ces données sont utilisées pour calculer une série temporelle de niveau d'eau avec le wave run-up. Les périodes de retour jusqu'à un an sont alors calculées de manière empirique en utilisant la méthode pics au-dessus du seuil (Pics Over Threshold, voir KERGADALLAN, 2013) pour isoler les tempêtes.

Afin de prendre en compte l'éloignement des sites les observations de niveau d'eau et de hauteur de vagues sont corrigées de la manière suivante :

- Sur le principe de la règle de trois et afin de transformer les valeurs (respectivement au niveau de *P1* et *P2*) en valeurs plus représentatives du site d'étude (quantiles en *P1* et *P2* ramenés au quantile de site d'étude) :
 - Les niveaux au marégraphe (en *P1* ou *P2*) sont normalisés par rapport au quantile 99,5% (de *P1* ou *P2*), puis ramenés au quantile 99,5% du site d'étude (plus exactement de *P0*, à proximité du site d'étude).
 - Les H_{m0} (en *ANEMOC_P1* ou *ANEMOC_P2*) sont normalisées par rapport à la hauteur de période de retour un an (de *ANEMOC_P1* ou *ANEMOC_P2*), puis ramenées à la hauteur de période de retour un an calculée en *ANEMOC_X*.
- Il est aussi pris en compte la perte d'énergie des vagues lors de leur transfert du large à la côte (calculée entre *ANEMOC_X* et *ANEMOC_X0*). Ce calcul prend aussi en compte le fait que le site n'est exposé qu'aux vagues de direction de provenance Est à Sud-Est (voir figure 1). Les H_{m0} en *ANEMOC_P1* ou *ANEMOC_P2* sont donc mises

à zéro si elles sont associées à une direction de provenance en *ANEMOC_X* en dehors du secteur Est à Sud-Est.

Le wave run-up est estimé par les formules de STOCKDON *et al.* (2006). Ce choix est effectué sur la base des états de l'art établis par DEAN et WALTON (2009) et CARIOLET (2011). Une modélisation numérique du wave run-up aurait été plus fine, mais un tel travail sortait très largement du budget (en terme de temps de travail) alloué à cette étude.

2.3 Approche basée sur la théorie des valeurs extrêmes

Cette approche est mise en œuvre pour le calcul des périodes de retour supérieures à un an. La méthode utilisée ici est très similaire à celle utilisée par l'approche empirique. La seule différence porte sur la nature de l'échantillon de données simultanées de niveau au marégraphe et de hauteur de vagues, utilisé pour le calcul des périodes de retours.

Au lieu de travailler directement sur les observations, la dépendance niveau au marégraphe / H_{m0} est modélisée par une loi de probabilité bivariée des valeurs extrêmes. Les périodes de retour des niveaux d'eau avec le wave run-up pourraient être établies à partir de l'intégration de cette loi de probabilité. Au lieu d'effectuer cette intégration et afin de simplifier les calculs, il est choisi ici une méthode de Monte-Carlo pour interpréter la loi de probabilité bivariée. Selon ce principe, la loi de probabilité est utilisée pour constituer un jeu artificiel de données simultanées de pics de tempête sur 10 000 ans. Ces 10 000 ans ne constituent en rien une prédiction ou une projection dans l'avenir, mais sont représentatifs des données au jour d'aujourd'hui, modélisées par la loi de probabilité. De manière identique à celle mise en œuvre dans l'approche empirique, ces valeurs sont corrigées du fait de l'éloignement des sites. Les périodes de retour sont alors calculées de manière empirique sur ces 10 000 ans.

La dépendance niveau au marégraphe / H_{m0} est modélisée (pour *P1/ANEMOC_P1* et *P2/ANEMOC_P2*) via une loi de probabilité bivariée des valeurs extrêmes (loi de GUMBEL (1960) ajustée par la méthode du maximum de vraisemblance censurée). Il est choisi une loi exponentielle pour modéliser les lois de probabilité univariée des valeurs extrêmes de H_{m0} et de niveau au marégraphe (échantillonnage par POT selon la méthode de double seuil de BERNARDARA *et al.* (2014), ajustement par la méthode du maximum de vraisemblance).

Afin de prendre en compte l'exposition du site d'étude au vagues, la dépendance niveau au marégraphe / H_{m0} est établie en ne prenant en compte que les H_{m0} associées à des vagues au large du site d'étude (en *ANEMOC_X*) de direction de provenance Est à Sud-Est.

Les 10 000 ans correspondant à des conjonctions de pics de tempête (avec un décalage possible de quelques heures entre le pic de H_{m0} et celui de niveau au marégraphe), il est nécessaire de modéliser le comportement des données au moment de la tempête. La méthode repose sur l'utilisation de formes de tempête normalisées (respectivement pour

le niveau au marégraphe et la H_{m0}), avec un tirage aléatoire du décalage en temps entre les pics de tempêtes. Ce tirage aléatoire est effectué parmi les décalages relevés dans les observations.

3. Résultats

3.1 Modélisation de la dépendance vague / niveau

Les résultats de l'ajustement de la loi de probabilité bivariée pour les couples $P1/ANEMOC_P1$ et $P2/ANEMOC_P2$ sont présentés figure 2.

Selon la méthode de double seuil de BERNARDARA *et al.* (2014), la population de pics de tempête est isolée au préalable par un seuil physique en essayant autant que possible d'associer un pic de tempête à un et un seul événement océano-météorologique. La loi de probabilité des valeurs extrêmes étant considérée comme exploitable qu'à partir d'une certaine valeur de pic de tempête (valeur à définir supérieure au seuil physique), la loi de probabilité est ensuite ajustée sur cette population pour les valeurs de pic au-dessus d'un deuxième seuil, le seuil statistique (valeur fixée entre autre à partir de résultat de tests statistiques).

La méthode de double seuil explique la présence figure 2 de deux seuils (physique et statistique) par type de données. Par construction :

- La modélisation de la dépendance ne porte que sur les conjonctions de pics de tempête. C'est ce qui explique pourquoi il n'y a pas de point en dessous des seuils utilisés pour définir les événements tempêtes (figure 2, zone 1).
- La loi de probabilité bivariée n'est exploitable qu'au dessus des seuils statistiques (figure 2, zone 3).

Sur la figure 2, l'ensemble des points où la H_{m0} est égale à 0 correspond aux pics de tempête de niveau d'eau au marégraphe associés à une H_{m0} de direction en dehors du secteur de provenance étudié.

Du fait de la non prise en compte des vagues de direction de provenance en dehors du secteur Est à Sud-Est au large du site d'étude (valeurs de H_{m0} mise à 0 sur la figure 2), la dépendance est relativement faible (coefficient de dépendance de COLES *et al.* (1999) de 0,11 pour $P1$ et 0,07 pour $P2$, 0 correspondant à l'indépendance et 1 à la dépendance maximale).

Selon la théorie des valeurs extrêmes, les résultats représentés sur la figure 2 ne sont valides qu'au-dessus des seuils statistiques (zone 3). C'est pourquoi les courbes d'iso-valeur de densité de probabilité n'apparaissent qu'en zone 3. A noter que l'interprétation de ces valeurs n'est pas intuitive puisqu'il convient d'intégrer la densité de probabilité sur un espace donné pour calculer une probabilité, et que la probabilité doit être interprétée au regard de la définition de l'événement étudié (ici des tempêtes avec un nombre variable par an selon le type de donnée et le site).

Zone 2 l'ordonnée des points représentés est bonne mais pas leur abscisse (on sait juste qu'ils sont dans la zone 2). Zone 4, l'abscisse des points représentés est bon mais pas leur ordonnée (on sait juste qu'ils sont dans la zone 4).

De ce fait, le résultat peut seulement être encadré par deux estimations :

- Pour la 1^{ère} estimation, une estimation basse (sous-estimation des niveaux), on ne considère que la zone 3 pour les calculs de période de retour. On ne prend donc pas en compte l'ensemble des conjonctions possibles niveau au marégraphe / H_{m0} pour calculer la période de retour du niveau d'eau avec le wave run-up.
- Pour la 2^{ème} estimation, une estimation haute (surestimation des niveaux), on considère que zone 2, les points ont pour abscisse la valeur du seuil de tempête, et zone 4, les points ont pour ordonnée la valeur du seuil de tempête.

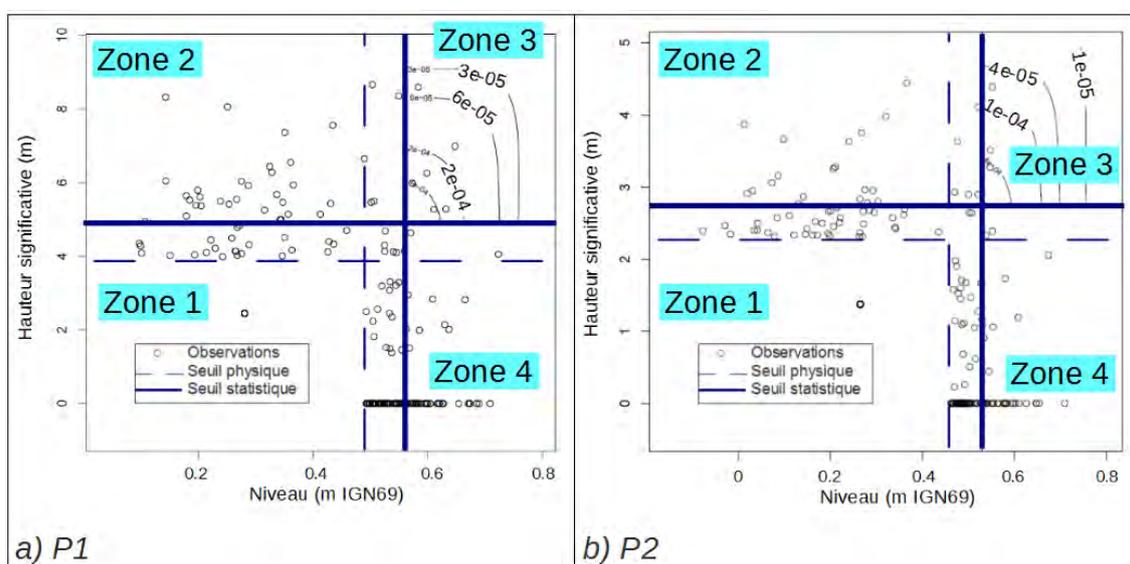


Figure 2. Densité de probabilité de la loi de probabilité bivariée H_{m0} / niveau au marégraphe.

3.2 Estimation des périodes de retour

Deux estimations sont fournies ici :

- L'estimation empirique correspond à l'approche statistique empirique (voir §2.3). Cette approche permet d'estimer les niveaux de période de retour inférieure ou égale à un an.
- Les estimations haute et basse permettent d'encadrer l'estimation issue de l'approche statistique par analyse de valeurs extrêmes (voir §2.4). Cette approche permet d'estimer les niveaux de période de retour supérieure à un an.

Les résultats sont présentés figure 3.

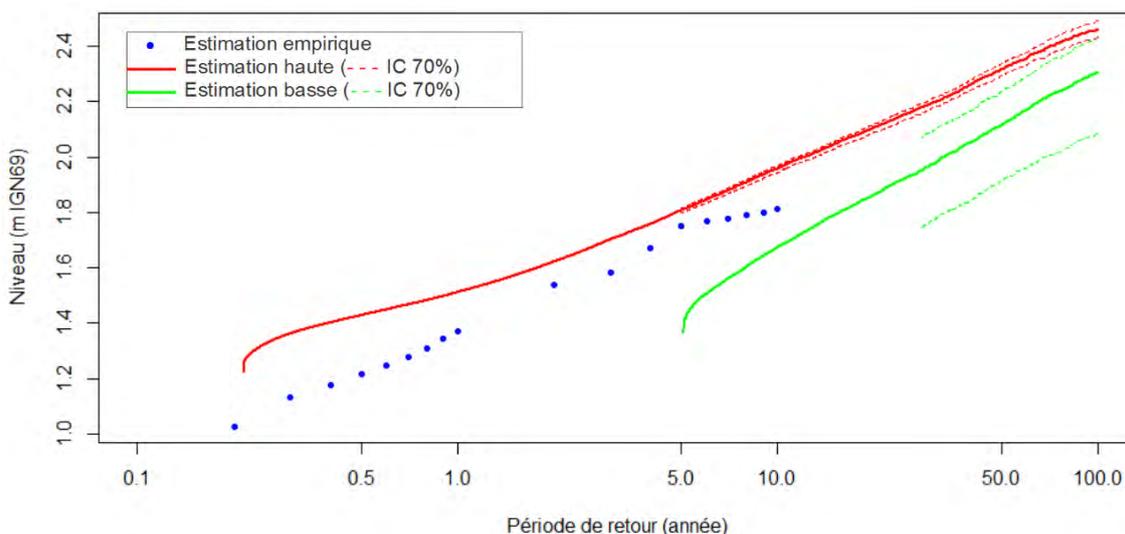


Figure 3. Estimation des périodes de retour des niveaux d'eau avec le wave run-up sur la plage.

Afin de quantifier l'influence de la surcote liée aux vagues sur le niveau d'eau total, il a été estimé le niveau d'eau sans l'action des vagues pour une période de retour d'un an. Ce niveau est estimé à 63 cm (l'intervalle de confiance n'a pas été calculé). La figure 3 montre que le niveau avec le wave run-up pour une période de retour annuelle dépasse largement 63 cm. L'influence des vagues est donc ici importante.

A titre d'ordre de grandeur et pour illustrer cette influence, pour une hauteur de vague au large annuelle (hauteur significative d'environ 4,3 m associée une période moyenne autour des 6,3 secondes), le wave set-up (composante statique de la surcote liée aux vagues) est estimé à 38 cm et le wave run-up (composantes statique et dynamique de la surcote liée aux vagues) à 97 cm.

3.3 Limites

Les résultats sont à considérer avec précaution du fait de l'ensemble des hypothèses utilisées pour les calculs. Ces hypothèses ont été nécessaires à cause de l'absence d'observation de niveau d'eau au droit des sites d'étude.

Il est fait le choix ici pour une question de coût de modéliser le wave run-up par les formules de STOCKDON *et al.* (2006). Cette approche est globale et ne prend pas en compte les spécificités du site (bathymétrie avant l'arrivée des vagues sur la plage, effet des courants côtiers, ...).

L'interprétation des résultats doit être corrélée à la forme et localisation des profils altimétriques utilisés pour calculer la pente. Il s'agit ici d'un résultat moyen qui ne prend pas en compte des variations de profils le long du site d'étude.

Les intervalles de confiance indiqués représentent les incertitudes liées à la méthode d'analyse statistique des événements extrêmes (choix des paramètres d'ajustement

univarié et bivarié). Ils ne prennent pas en compte l'incertitude sur les données (en particulier celle liée à la simulation numérique ANEMOC-2) et l'incertitude sur la méthode d'analyse spatiale (dont le principe d'interpolation des niveaux et la modélisation des facteurs de transfert).

Les résultats doivent être considérés comme une première estimation d'un résultat moyen sur l'ensemble de la plage étudiée.

4. Conclusion et perspectives

Le niveau d'eau étudié ici est dû à la combinaison de la marée, de la surcote météorologique et du wave run-up.

En l'absence de données d'observation au droit du site d'étude, la méthode mise en œuvre repose sur l'utilisation des observations de niveau d'eau aux marégraphes les plus proches (données REFMAR du SHOM) et des simulations numériques des états de mer de la base de données ANEMOC-2 (EDF R&D, Cerema).

Le principe de la méthode d'analyse spatiale est celui développé par KERGADALLAN (2015). Afin de limiter le coût de l'étude, et donc les temps de calcul, le wave run-up est calculé par la formule STOCKDON *et al.* (2006). Les caractéristiques de la plage sont établies à partir des données Litto3D®.

Deux approches statistiques sont utilisées. La première est une approche empirique pour l'estimation des périodes de retour inférieures ou égales à un an. La deuxième est une approche basée sur la théorie des valeurs extrêmes avec la modélisation de la dépendance vague / niveau par une loi bivariée des valeurs extrêmes (loi de Gumbel). Pour la deuxième approche, du fait du domaine de validité limité de la loi bivariée, le résultat est encadré par une estimation basse (non conservative) et une estimation haute (conservative).

Il est important dans les calculs de prendre en compte l'exposition aux vagues, exposition spécifique au site étudié. Les analyses des extrêmes et le calcul du transfert des vagues du large à la côte ne sont effectués que sur ce seul secteur de provenance des vagues.

La présente analyse a permis d'établir pour les niveaux d'eau avec l'action des vagues :

- un profil de périodes de retour pour les périodes comprises de six mois à un an ;
- et deux profils de périodes de retour pour les périodes comprises de un et cent ans, correspondant respectivement une estimation basse et une estimation haute.

Du fait de l'ensemble des hypothèses posées, les résultats doivent être considérés comme une première estimation d'un résultat moyen sur l'ensemble de la plage étudiée.

Dans l'interprétation des résultats il convient de prendre en compte les valeurs utilisées pour caractériser la pente de la plage. Une augmentation de la pente conduit ici à une augmentation des niveaux d'eau, et inversement. La pente de la plage peut notamment varier au fil des saisons.

La méthode présentée peut être améliorée de façon notable en substituant la formule de STOCKDON *et al.* (2006) par un modèle numérique du wave run-up établi à partir des données bathymétriques et la prise en compte de l'ensemble des interactions entre les vagues et l'environnement. L'élaboration d'un tel modèle nécessiterait plusieurs mois de travail supplémentaires.

5. Références bibliographiques

- BERNARDARA P., MAZAS F., KERGADALLAN X., HAMM L. (2014). *A two-step framework for overthreshold modelling of environmental extremes*, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 14, pp 635-647. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-14-635-2014>
- BRGM (2010). *Système de prévision de surcotes en Manche/Atlantique et Méditerranée : Sites sélectionnés et collecte-traitement des données (D2)*. Rapport BRGM/RP-59039-FR.
- CARIOLET J.M. (2011). *Quantification du runup sur une plage macrotidale à partir des conditions morphologiques et hydrodynamiques*. Géomorphologie : relief, processus, environnement.
- COLES S.G., HEFFERMAN J., TAWN J. (1999). *Dependence measures for extreme value analyses*. Extremes, Vol. 2, pp 339-365. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009963131610>
- DEAN R.G., WALTON T.L. (2009). *Wave setup*. In Handbook of coastal and OceanEngineering, By Young C, Kim ed., World scientific, pp 1-23. http://dx.doi.org/10.1142/9789812819307_0001
- GUMBEL E.J. (1960). *Distribution des valeurs extrêmes en plusieurs dimensions*. Inst. Statist. Univ. Paris, 9, pp 171-173.
- KERGADALLAN X. (2013). *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes - Environnements maritime et estuariens*. Edition CETMEF, Compiègne.
- KERGADALLAN X. (2015). *Estimation des niveaux marins extrêmes avec et sans l'action des vagues le long du littoral métropolitain*. Thèse de doctorat de l'université de Paris Est.
- STOCKDON H.F., HOLMAN R.A., HOWD P.A., SALENGER JR. A.H. (2006). *Empirical parameterization of set-up, swash, and runup*. Coastal Engineering, Vol. 53, pp 573-588. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>